

岡山大学記者クラブ加盟各社  
文部科学記者会  
科学記者会

御中

平成 26 年 12 月 24 日  
岡 山 大 学  
理 化 学 研 究 所

## 植物のビタミンC輸送体を世界で初めて同定

岡山大学自然生命科学研究支援センターの宮地孝明准教授、大学院医歯薬学総合研究科の森山芳則教授、資源植物科学研究所の馬建鋒教授、理化学研究所環境資源科学研究センターの黒森崇上級研究員らの共同研究グループは、アスコルビン酸<sup>\*1</sup>（通称：ビタミンC）を葉緑体<sup>\*2</sup>へ運ぶ輸送体<sup>\*3</sup>（トランスポーター）を世界で初めて突き止めました。本研究成果は、平成 27 年 1 月 5 日、英国の科学雑誌『*Nature Communications*』電子版（英国時間：午前 10 時）に掲載されます。

植物は、強い光にさらされるとミトコンドリア<sup>\*4</sup>でビタミンCを作り、葉緑体へ運びます。葉緑体に運ばれたビタミンCは葉の光障害を防ぐ役割をしています。葉緑体のビタミンCトランスポーターは長年探し求められていましたが、これまで同定されていませんでした。

本研究成果によって、環境ストレス耐性能を備えた植物育種の開発が進めば、食糧問題や緑化対策による地球温暖化の解決などが期待されます。

### < 背 景 >

強光・乾燥・塩害などの環境ストレスにより地球規模で農地が悪化し、近年、作物収量の減少が深刻化しています。環境問題の克服や改善には、作物のストレス耐性能を少しでも上げることが必要です。また、植物のストレス耐性能を上げることは、食料問題だけでなく、地球の温暖化の解決に向けた緑化対策などにも役立ちます。

植物は強い光にさらされると、光合成による過剰エネルギーが葉緑体に蓄積し、葉やけなどの光障害を引き起こします。そのため、植物には光障害から葉緑体を守る仕組みがあります。その一つが、補助色素のキサントフィル<sup>\*5</sup>類を集光効率の低い物質に変換し、過剰な光エネルギーを熱に変えて散逸させる仕組み（非光化学消光<sup>\*6</sup>）です。ミトコンドリアから葉緑体に運びこまれたビタミンCはその変換の補因子として働きます。ビタミンCは、光ストレスを軽減しつつ、活発に光合成を行う仕組みを支えています。

葉緑体のビタミンCトランスポーターを特定することは、ビタミンCの役割の解明や光ストレス耐性能を備えた植物育種への応用にとって重要な課題です。しかしながら、これまで良いトランスポーターの輸送活性評価法がなかったため、葉緑体にビタミンCを運ぶトランスポーターは特定されていませんでした。

### <研究手法と成果>

本研究グループは、大腸菌<sup>※7</sup>に任意のトランスポーターを大量に発現させ、精製し、人工膜小胞<sup>※8</sup>に組み込む独自の輸送活性測定法を開発。AtPHT4;4 タンパク質が、ビタミンC トランスポーターであることを突き止めました（図1）。本トランスポーターは、光が強く当たる葉の表側の葉緑体に多く発現。葉緑体の入り口にある包膜に局在していることがわかりました（図2）。この遺伝子発現は光ストレス下で大きく上昇し、効率的にビタミンCを葉緑体に運んでいました。

また、葉緑体のビタミンC トランスポーター遺伝子を欠損したシロイヌナズナ<sup>※9</sup>（モデル植物）を解析したところ、葉緑体のビタミンC含量が少なく、光ストレス耐性能が低下していることを確認しました。葉緑体にビタミンCが運ばれなくなることで、光ストレスを熱として逃がす非光化学消光が阻害。集光効率の低いキサントフィル類への変換も著しく阻害されていることがわかりました（図3）。

以上の研究成果より、ミトコンドリアから葉緑体に運ばれたビタミンCは、光合成により生じた過剰な光エネルギーを熱として逃がす過程の補因子として必須であり、その結果、光ストレス耐性能を獲得していることがわかりました（図4）。

### <見込まれる効果>

本研究成果により、植物が持つ巧妙な生存戦略の一つである光ストレス耐性メカニズムに関する重要な知見を得ることができました。

ビタミンC トランスポーターは、シロイヌナズナだけでなくイネやトウモロコシなどの作物を含む幅広い植物種に存在しています。今後、これらの植物種の葉緑体のビタミンC輸送を制御することによって、光ストレス下に適応できるストレス耐性能を備えた植物育種への応用が期待されます。

### <原論文情報>

Takaaki Miyaji, Takashi Kuromori, Yu Takeuchi, Naoki Yamaji, Kengo Yokosho, Atsushi Shimazawa, Eriko Sugimoto, Hiroshi Omote, Jian Feng Ma, Kazuo Shinozaki, Yoshinori Moriyama. AtPHT4;4 is a chloroplast-localized ascorbate transporter in *Arabidopsis*.

*Nature Communications*, 2014, DOI: 10.1038/ncomms6928

本研究成果は、文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究、基盤研究）などの研究助成を受け、実施しました。

<補 足>

※1 アスコルビン酸

水溶性ビタミンの一種であり、ビタミンCと呼ばれている。還元型と酸化型が存在するが、一般的に還元型のことである。植物においてアスコルビン酸は全体に広く分布している。葉の葉緑体に多く含まれ、光合成時に抗酸化物質や代謝反応の補因子、電子供与体として働き、光ストレス耐性能を付与する役割がある。

※2 葉緑体

植物の葉に存在し、光合成をする細胞小器官である。細胞質と葉緑体を区切る膜は包膜と呼ばれる。光合成は、太陽の光エネルギーを使って、水と空気中の二酸化炭素から炭水化物を作り、酸素を大気中に供給している。

※3 輸送体（トランスポーター）

生体膜を貫通しているタンパク質のうち、生体膜を通過させて物質の輸送を担うタンパク質の総称である。

※4 ミトコンドリア

真核生物の細胞に含まれる細胞小器官であり、主にエネルギー源であるATPの生合成に関わっている。植物では、ミトコンドリアでビタミンCの生合成も担っている。

※5 キサントフィル

カロテノイド由来の光合成の補助色素である。キサントフィル類のゼアキサンチン、アンテラキサンチン、ビオラキサンチンが相互に変換することで、光エネルギーを熱放散し、光障害から葉緑体を守る仕組みをキサントフィルサイクルと言う。

※6 非光化学消光

葉緑体のクロロフィル蛍光を測定すると、光合成に関するパラメーターを評価することができる。非光化学消光はこのパラメーターの一つであり、光合成で生じた過剰な光エネルギーを熱として逃がす現象のことである。これはキサントフィルサイクルとも呼ばれ、この酵素反応にはビタミンCが補因子として必要である。

※7 大腸菌

研究に最もよく用いられる細菌の一つであり、有用タンパク質の産生や遺伝子組換え実験などに利用される。

※8 人工膜小胞（リポソーム）

主にリン脂質で構成されており、袋状の構造をしている。生体膜を模した小胞のことであり、トランスポーター研究においてよく利用される。

※9 シロイヌナズナ

アブラナ科シロイヌナズナ属の一年草である。全ゲノム解読が完了しており、研究材料として利用しやすいため、植物のモデル生物としてよく研究に利用される。

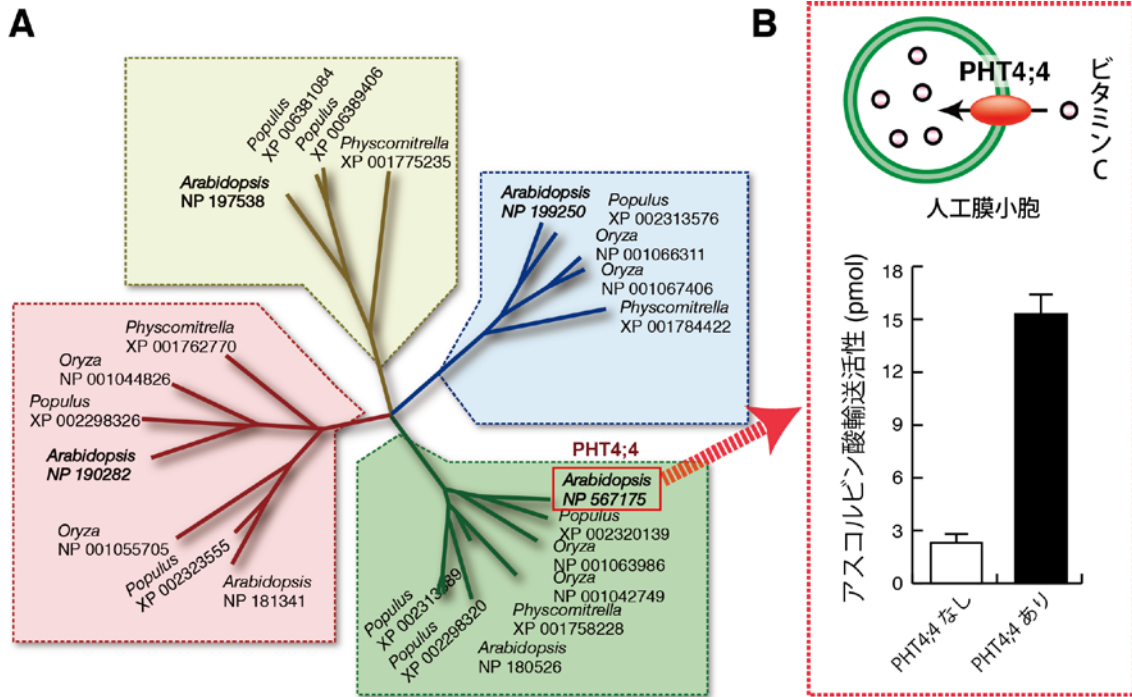


図1 ビタミンCトランスポーターを世界で初めて同定した

(A) 今回同定したビタミンCトランスポーターを含む遺伝子群を示した。(B) この遺伝子群のうち、シロイヌナズナの PHT4;4 タンパク質にビタミンC輸送活性があることを突き止めた。PHT4;4 を組み込んだ人工膜小胞は組み込んでいないものに比べ、約五倍のビタミンCを人工膜小胞内に輸送した。

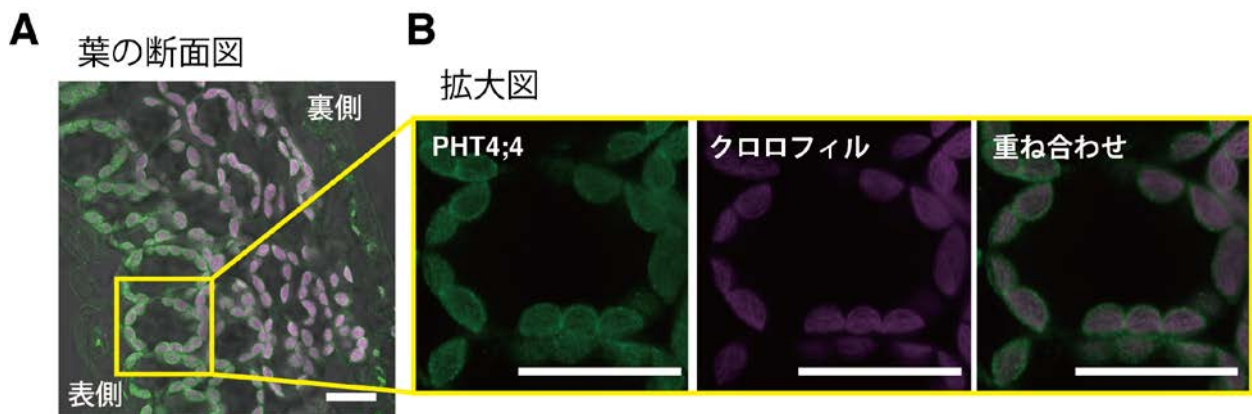


図2 今回同定したビタミンCトランスポーターは葉緑体包膜に局在していた

(A) 間接蛍光抗体法を用いて葉の顕微鏡写真を撮影した。緑色がビタミンCトランスポーター (PHT4;4)、紫色が葉緑体のクロロフィル (葉緑素) を示している。(B) 黄色のボックス部分の拡大図を示した。クロロフィルの周囲にビタミンCトランスポーターが局在していた。ここは包膜と呼ばれる葉緑体の入り口に相当する。各白線の長さは 20 μm である。

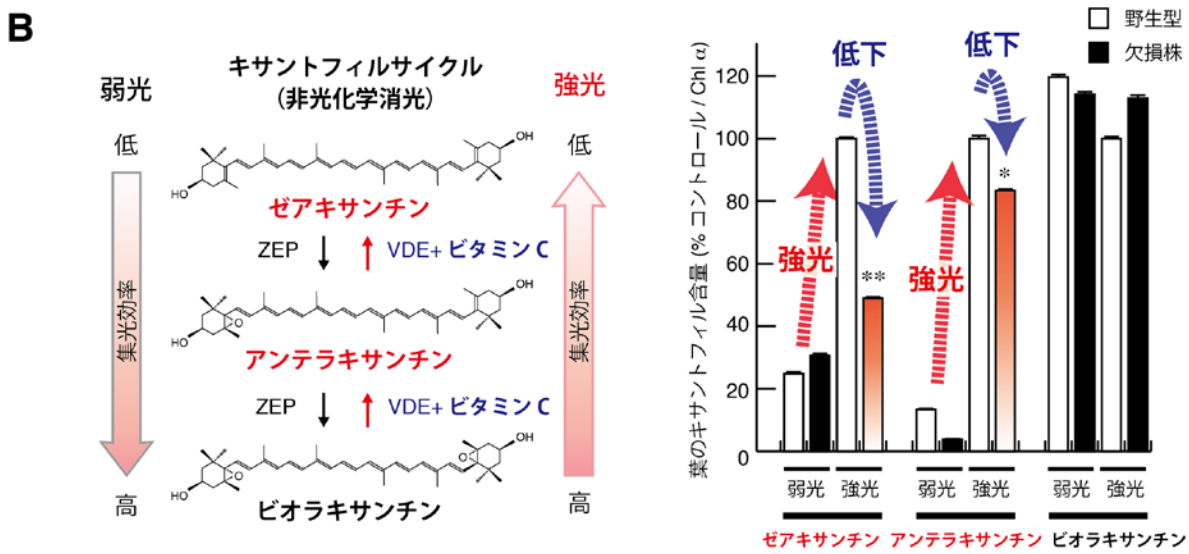
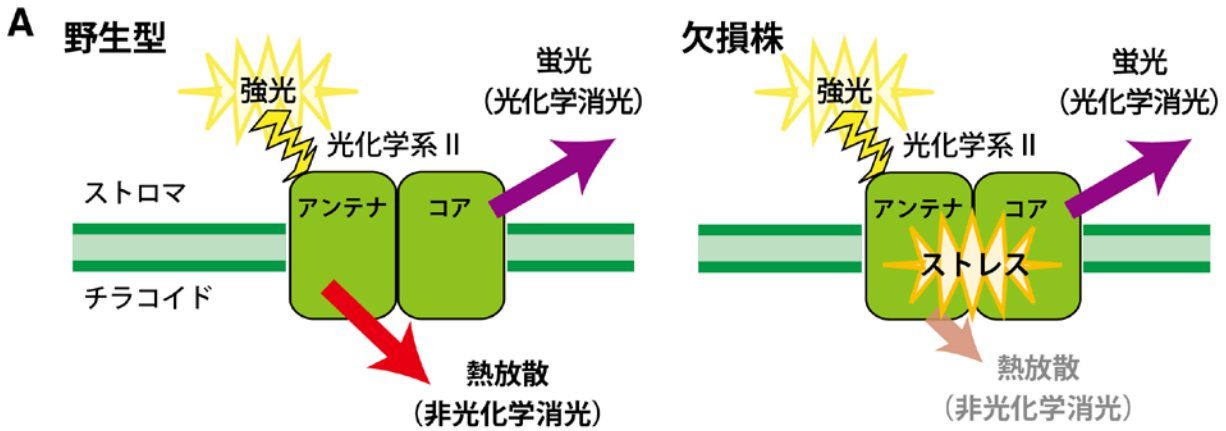


図3 ビタミンCトランスポーターを欠損したシロイヌナズナは光ストレス耐性能が低下した

(A) 植物は光合成で生じる過剰な光エネルギーを蛍光あるいは熱として逃がし、葉緑体を光障害から守っている。ビタミンCトランスポーターを欠損したシロイヌナズナは、光エネルギーを熱放散する過程（非光化学消光）が阻害されていた。(B) 非光化学消光の仕組みを示した（左）。葉が強い光にさらされると、変換酵素（VDE; ビオラキサントチンデエポキシダーゼ）と補因子であるビタミンCは集光効率の高いビオラキサントチンから集光効率の低いゼアキサントチンに変換し、過剰な光エネルギーを熱放散する。ビタミンCトランスポーターを欠損したシロイヌナズナはビオラキサントチンからゼアキサントチンに変換することができなくなり、光ストレスを受けやすくなることがわかった。

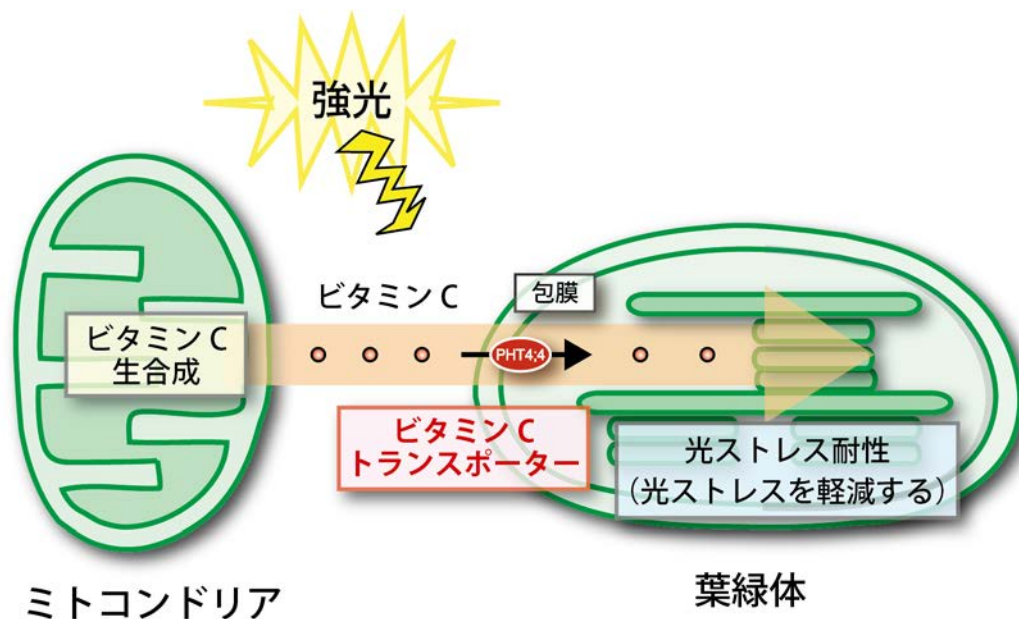


図4 葉緑体のビタミンC輸送メカニズムとその生理的役割

ビタミンCは光ストレスに応じてミトコンドリアで作られる。このビタミンCは今回同定したトランスポーターによって葉緑体に運ばれ、光ストレスを軽減する役割を担うことを明らかにした。

<お問い合わせ>

岡山大学 自然生命科学研究支援センター  
准教授 宮地 孝明 (みやじ たかあき)

TEL : 086-251-7260

FAX : 086-251-7264

独立行政法人理化学研究所 環境資源科学研究センター  
上級研究員 黒森 崇 (くろもり たかし)

TEL : 045-503-9625

FAX : 048-503-9586